



Eng.º F. Pacheco Torgal
Doutor em Materiais de
Construção, Grupo de
Construção Sustentável
Unidade de Investigação
C-TAC, Universidade do Minho



Eng.º Said Jalali
Professor Catedrático
Departamento de Engª Civil
Universidade do Minho

Impulso de betões auto-compactáveis (BAC's) em cofragens de paredes e pilares

Sumário

A utilização de BAC's na betonagem de peças verticais (muros de suporte e pilares) levanta sérias questões que se prendem com a existência de elevados valores do impulso a suportar pelas cofragens dessas peças. No presente artigo são tecidas algumas considerações sobre os factores que devem ser levados em conta na especificação de BAC's para betonagem de peças verticais, afim de prevenir eventuais roturas da cofragem ou a utilização de cofragens especiais de custos acrescidos. Particular incidência é dada à questão da influência entre o impulso e a composição dos BAC's, a consistência, o tipo de betonagem (pelo topo ou pela base da cofragem), a densidade das armaduras do elemento a betonar e o material utilizado na execução da cofragem. É ainda sugerido que o controlo da velocidade de betonagem, a par da monitorização contínua dos impulsos na cofragem, pode ser uma forma de evitar despesas associadas a dimensionamentos de cofragem excessivamente conservadores.

1. Introdução

Os BAC's representam uma evolução tecnológica cuja característica mais evidente é a sua capacidade de “*fluir*

quando colocado num molde, escoando de uma forma natural por entre as armaduras, envolvendo-as e preenchendo o respectivo molde, apenas sob o efeito do seu peso próprio, sem que ocorram fenómenos de segregação durante a sua aplicação” [1]. Diferindo dos betões correntes também pela sua composição, com uma elevada quantidade de materiais finos, onde se inclui o cimento Portland, as adições pozolânicas (cinzas volantes, metacaulino e outras), ligantes hidráulicos fracos como as escórias de alto forno e ainda pó de pedra como filler, os BAC's contém além disso uma elevada quantidade de superplastificantes, que estão na base do seu comportamento fluido. Relativamente aos betões correntes os BAC's permitem dispensar as tradicionais operações de compactação, as quais eram aliás muito difíceis de efectuar em peças fortemente armadas, utilizar elevadas velocidades de betonagem com redução dos prazos de conclusão das estruturas, assim permitindo uma melhor produtividade global. Como desvantagem mais evidente, a fluidez dos BAC's torna-os no entanto responsáveis por maiores valores de impulso sobre as cofragens e sobre o escoramento, sendo que na maior parte dos casos esses impulsos podem atingir o valor da pressão hidrostática. Várias são aliás as recomendações

normativas que aconselham a que a cofragem a utilizar em estruturas executadas com BAC's deva ser projectada para um impulso hidrostático. Estão nesta situação as recomendações da ACI 347 R [2] ou do European Federation of Producers and Contractors of Specialist Products for Structures (EFANRC). Este facto faz com que haja necessidade de reduzir a velocidade de betonagem ou utilizar cofragens mais robustas o que aumenta consideravelmente os custos e reduz a competitividade dos BAC's. No entanto outros autores referem valores de impulso em peças verticais betonadas com BAC's, que são bastante inferiores aos da pressão hidrostática. Leemann & Hoffmann [3] observaram impulsos de 87 a 90% da pressão hidrostática em BAC's, registando somente 55% desse valor para betões correntes, embora nestes últimos o impulso atingisse valores idênticos aos da pressão hidrostática durante a fase de vibração. Segundo Billberg [4] embora nos primórdios do aparecimento dos BAC's se partisse do princípio que o impulso na cofragem fosse igual à pressão hidrostática, a verdade é que na execução das primeiras pontes construídas na Suécia com BAC's 1998, os resultados obtidos em contexto de obra apresentavam valores bastante inferiores, o que se fica a dever ao comportamento tixotrópico daqueles materiais. Os BAC's comportam-se como um líquido durante a mistura, transporte e a betonagem mas desenvolvem uma estrutura interna quando em repouso. Esta incerteza leva a que, fundamentalmente por razões de segurança, os Técnicos que trabalham nesta área optem por fazer um dimensionamento da cofragem para a situação mais desfavorável, ou seja, admitindo a possibilidade de ocorrência de impulsos da mesma ordem de grandeza da pressão hidrostática 'Eq. (1)'.

$$I = \gamma \cdot h \quad (1)$$

em que γ -massa volúmica do betão (24kN/m^3) e h é a altura do betão na cofragem em m. A referida opção conduz no entanto a um sobredimensionamento das cofragens e a um claro desperdício de recursos. Em Portugal, são correntemente utilizados métodos para

cálculo do valor do impulso a considerar no dimensionamento de cofragem de peças de betão [5], que recorrem a recomendações da Civil Industries Research and Information Association – CIRIA. Estas recomendações levam em conta a velocidade de betonagem, a temperatura, a consistência e as condições de descarga, mas não são particularmente indicadas para BAC's. Neste contexto o presente artigo analisa investigações já levadas a cabo neste âmbito, sobre as diversas variáveis que influenciam o valor do impulso dos BAC's. Assim contribuindo para a divulgação deste conhecimento e permitindo por um lado que em obra os Técnicos possam tomar decisões mais económicas e seguras e por outro que ao nível da comunidade científica haja uma focalização nesta área, onde obviamente são necessários mais estudos.

2.COMPOSIÇÃO DOS BAC'S

2.1 Volume de agregados grossos

São vários os trabalhos sobre influência da composição dos BAC's no impulso sobre as cofragens. Composições com maior quantidade de cimento estão associadas a maiores impulsos, que se ficam a dever ao facto destas misturas conterem menor quantidade de agregados e logo menor viscosidade interna contribuindo para uma maior mobilidade interna do betão. Como se pode constatar na Fig.1 imediatamente após a betonagem o BAC com uma razão areia/agregado grosso=1 está associado a um impulso aproximadamente do mesmo valor do impulso hidrostático. Os BAC's em que se parâmetro se vai reduzindo, estão associados a impulsos relativos decrescentes, sendo que esse impulso é mínimo para a composição com a menor razão areia/agregado grosso=0.3. Para esta última composição, decorridos 250 minutos após a betonagem o seu impulso é 50% do impulso hidrostático, sendo que na mesma altura a composição com menor quantidade de agregados grossos (1.0 SCC) apresenta um impulso que é superior a 90% do impulso hidrostático.

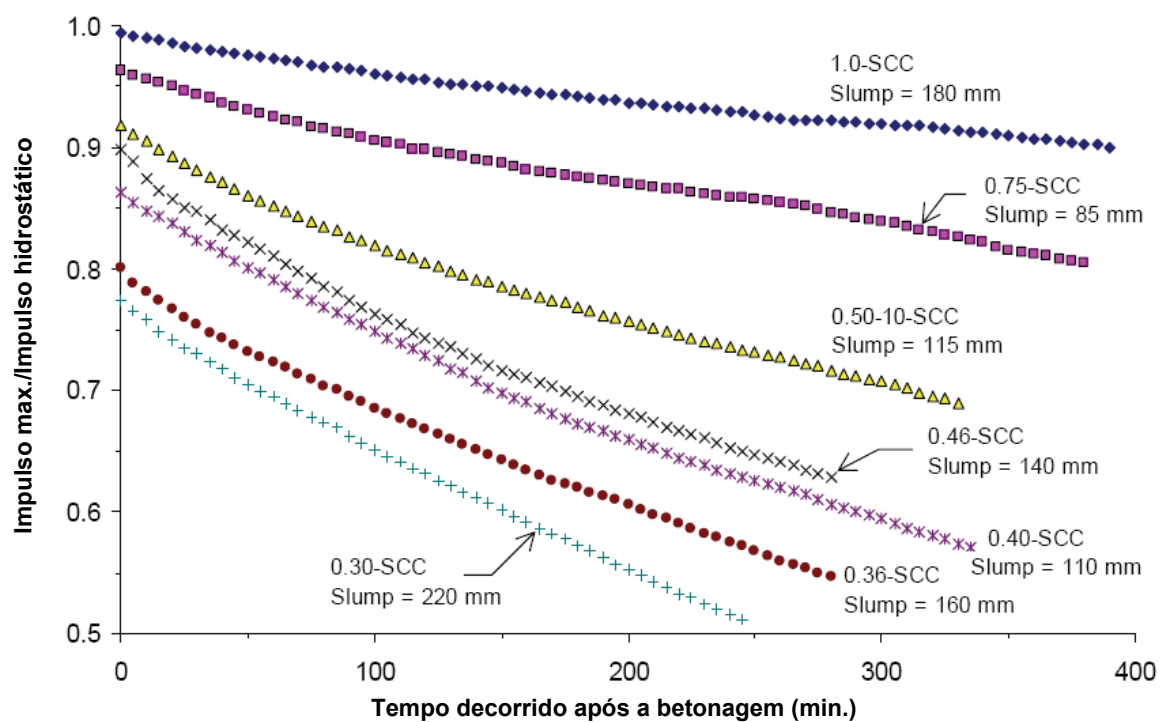


Figura 1. Impulso relativo na cofragem para BAC's com diferentes teores razões de areia/agregado grosso. Os valores de slump do gráfico foram determinados no fim do registo dos impulsos [6]

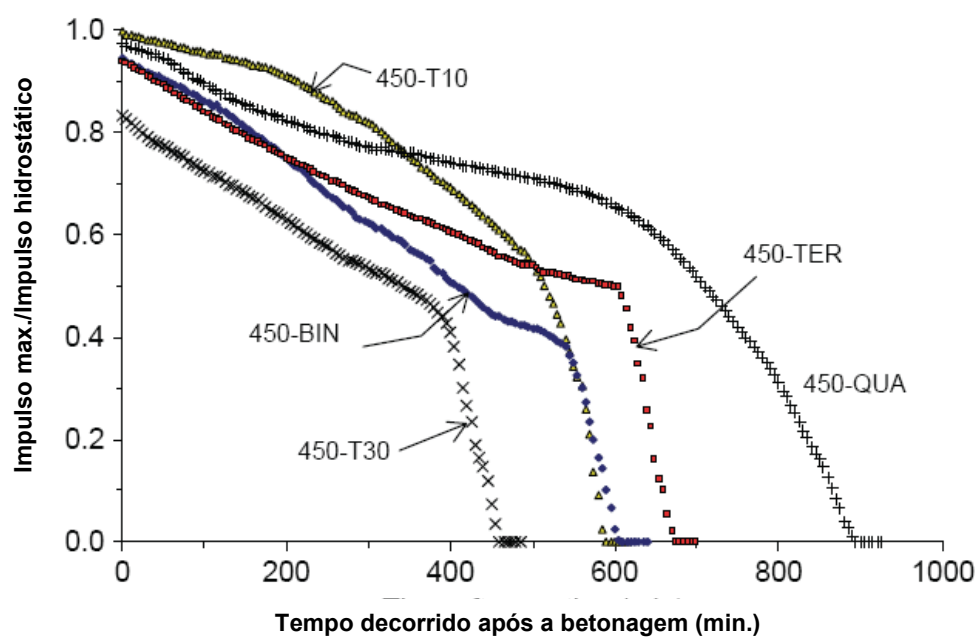


Figura 2. Impulso relativo na cofragem para BAC's com uma dosagem de 450kg/m^3 de vários tipos de ligantes [8]

2.2 Tipo de ligantes e aditivos

Investigações sobre a substituição de cimento por cinzas volantes numa percentagem até 50%, resultaram em maiores impulsos na cofragem, que se ficam a dever ao facto das cinzas contribuírem para um aumento da mobilidade interna, bem como também ao facto de reduzirem a hidratação e o desenvolvimento da resistência [7]. Alguns autores [8] estudaram BAC's em que o volume de cimento foi mantido constante (450kg/m^3), tendo observado menores impulsos relativos para as composições sem aditivos (450-T30) (Fig.2). Já as composições binárias 450-BIN (92%cimento+8% de sílica de fumo), ternárias 450-TER (72%cimento+22% cinzas volantes +6% de sílica de fumo) e quaternárias 450-QUA (50%cimento+26% cinzas volantes +18% de escórias + 6% de sílica de fumo), evidenciam impulsos relativos que crescem com a percentagem de aditivo, ou seja, com a diminuição da percentagem de cimento.

2.3 Consistência

Alguns autores [9] analisaram os impulsos provocados por BAC's com um volume de ligante de 450kg/m^3 , uma razão água/ligante de 0.4 e três níveis de consistência medidos no ensaio de espalhamento, de 550mm (SCC-TER-550), de 650mm (SCC-TER-650) e de 750mm (SCC-TER-750) e observaram (Fig.3) que a composição com a menor consistência (SCC-TER-550), é aquela que está associada ao menor nível de impulso relativo, de aproximadamente 75% do impulso hidrostático. Já as composições com maior consistência registam impulsos proporcionalmente superiores. Estas observações confirmam que o impulso de BAC's nas cofragens é fortemente influenciado pelo seu nível de consistência, facto que se fica a dever à redução da possibilidade de formação de uma estrutura interna contínua [10,11]. A influência do aumento da quantidade de superplastificantes na redução do fenómeno de estruturação é também confirmada noutras investigações [12].

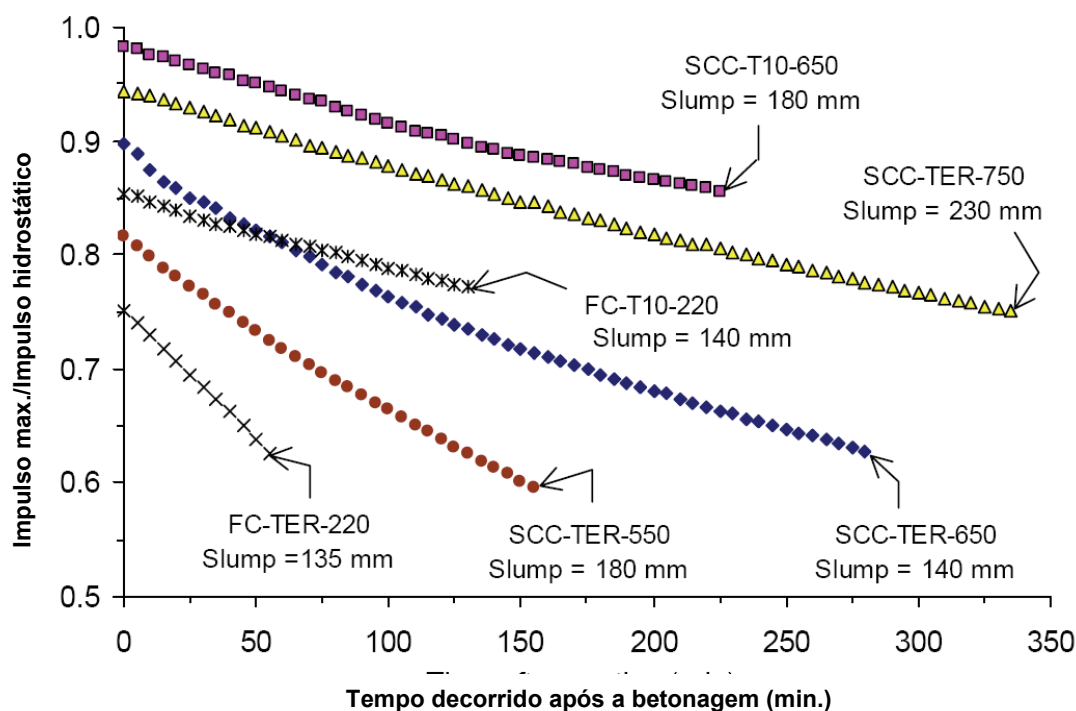


Figura 3. Impulso relativo na cofragem para BAC's com diversos níveis de consistência. Os valores de slump do gráfico foram determinados no fim do registo dos impulsos [9]



Figura 4. Betonagem com BAC a partir da base da cofragem

3. Betonagem Pelo Topo Ou Pela Base Da Cofragem

Embora a utilização de betonagens com a recurso a BAC's feita a partir da base da cofragem (Fig.4) ainda não seja corrente em Portugal, este procedimento já é usual noutros países [13,14]. Esta forma de enchimento da cofragem revela-se no entanto mais gravosa em termos de impulsos sobre a cofragem do que o enchimento tradicional pelo topo. Leemann & Hoffmann [3] analisaram a utilização de BAC's na betonagem de peças verticais a partir da base, com uma válvula a 60cm da base e uma pressão de bombeamento entre 1.5-2MPa (23m³/h ou uma velocidade de subida na cofragem 18.8m/h), mencionando a obtenção de impulsos que por vezes excedem o impulso hidrostático, pelo facto do betão à saída da válvula na base da cofragem ter de exceder a pressão do betão já existente na cofragem. Segundo estes autores a possibilidade de ocorrência de colapso na cofragem é assim superior para enchimentos a partir da base. Também que durante o processo de enchimento pela base, não pode haver interrupção do enchimento, pelo facto disse poder provocar a formação de aglomerados de partículas.

Outros autores [15] estudaram o impulso de BAC's numa cofragem tipo com uma altura de 3,3 m e uma secção de 3,51×0,24m², para uma betonagem pela base e pelo topo, com velocidades de 2 e 10m/h. Referindo que a probabilidade de ocorrência de pressões hidrostáticas só ocorreu para enchimento de cofragens a partir da base, sendo que para enchimentos a partir do topo da cofragem os impulsos são metade dos primeiros. Também que para o enchimento a partir do topo, aumentar a velocidade de betonagem de 2 para 10m/s, origina um acréscimo do impulso máximo de 68% para os 3,5m, sendo que esse acréscimo se inicia a partir de uma altura de 1,5m. Já se o enchimento for a partir da base não há diferenças do impulso pelo menos até uma altura de enchimento de 2,8m, sendo que daí até aos 3,5m regista-se um acréscimo de aprox. 20%.

4. Densidade de armadura no elemento a betonar

Perrot et al. [16] estudaram o impulso na cofragem de uma parede com uma determinada percentagem de

armadura. Para o efeito utilizaram um modelo desenvolvido por Roussel & Ovarlez [17], segundo o qual o impulso relativo σ , ou seja, a razão entre o impulso real e o impulso hidrostático na base da cofragem, pode ser calculado através da 'Eq. (2)'.

$$\sigma' = 1 - [(H.A_{thix}) / (p.g.e.R)] \quad (2)$$

e sendo a redução do impulso relativo $\Delta\sigma'$ imediatamente a seguir à betonagem dada pela 'Eq. (3)'.

$$\Delta\sigma' = - 2A_{thix}Ht/e \quad (3)$$

em que H - altura do betão na cofragem em m, A_{thix} - velocidade de desenvolvimento de uma estrutura interna continua no betão em Pa/s[18], e-espessura da cofragem em m, R - velocidade de betonagem em m/s, p-densidade do betão, t- tempo após a betonagem, g-constante de gravidade ($9,8ms^{-2}$).

Segundo estes autores a expressão para o cálculo do impulso relativo que permite contabilizar também a influência da armadura vertical é dada pela 'Eq. (4)'.

$$\sigma' = 1 - [(H.A_{thix}) / (p.g.R)].[(\phi_b + 2S_b) / (e.\phi_b - S_b\phi_b)] \quad (4)$$

em que ϕ_b -diâmetro dos varões e S_b -Secção de armadura por metro linear de cofragem. Os mesmos concluem que para uma percentagem de armadura de 0.5%, com um diâmetro de 10mm haverá uma redução do impulso nas cofragens para 50% do impulso que existiria sem a presença daquelas. Estes resultados comprovam a importância do cálculo do impulso em cofragens provocado por BAC's levar em conta a contribuição da armadura para a sua redução.

5. Material utilizado na cofragem

Alguns autores [19] estudaram a influência do material utilizado na cofragem de paredes, no impulso provocado por BAC's, tendo observado que este é maior para

cofragens de metal e menor para cofragens de madeira de pinho secas (Quadro 1).

Quadro 1. Impulso na cofragem de acordo com o material utilizado (kPa) [19]

Material	Impulso médio [kPa]
Aço	26.19
Madeira de choupo (molhada)	22.85
Madeira de choupo seca	20.93
Madeira de pinho (molhada)	23.68
Madeira de pinho seca	19.91
MDF (molhado)	24.55
MDF seco	21.48

Sendo que as cofragens de aço apresentam em média um impulso 32% superior às de madeira de pinho seca. Estes resultados permitem concluir que o impulso é maior em cofragens com menor rugosidade, já que estas mobilizam muito menos esforço por atrito no interface cofragem/betão do que as cofragens mais rugosas. Os mesmos autores observaram também que a molhagem da madeira da cofragem, um procedimento correntemente utilizado para evitar que aquela absorva água do betão, contribui para o aumento do impulso na cofragem, fenómeno que tem que ver com a dilatação da madeira durante a absorção. Já Djelal et al. [20] constataram que a utilização de óleo descofrante contribui para um aumento do impulso por via da redução do atrito entre o betão e a cofragem.

6. Monitorização e controlo do impulso por via da velocidade de betonagem

Billberg [12] sugere que uma das formas de obstar ao dimensionamento da cofragem para a situação limite do impulso hidrostático, passa pela utilização sensores que permitam a monitorização continua do impulso, sendo que a velocidade de betonagem será feita de modo a assegurar que o impulso não exceda os valores máximos para os quais a cofragem tenha sido dimensionada. Varios autores tem utilizado diferentes tipos de sensores (Fig.5) para medição do impulso provocado por BAC's [3, 15,19].

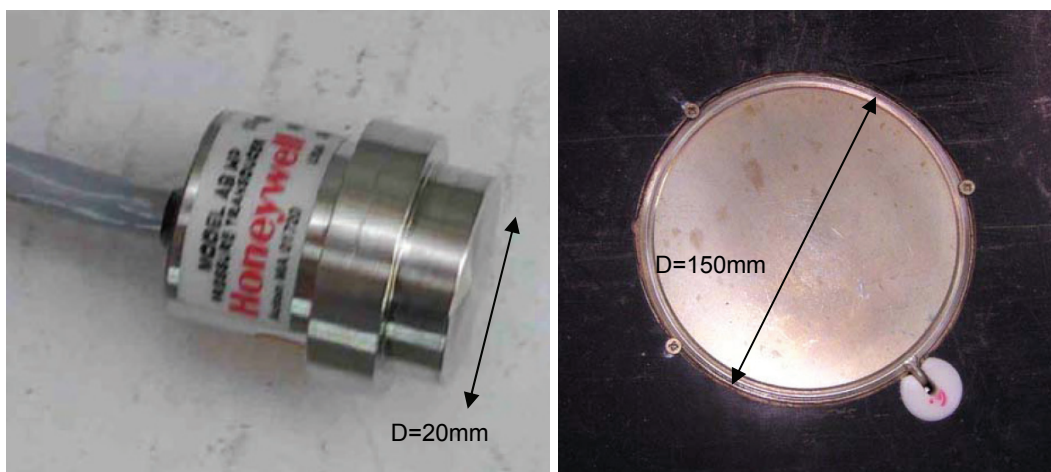


Figura 5. Sensores para monitorização do impulso de BAC's

Assad & Khayat [21] recomendam que o diâmetro dos sensores deve ser maior que a dimensão máxima do agregado utilizada na composição do betão. Estes autores utilizaram sensores com um diâmetro de 20mm, para avaliar o impulso de BAC's, em que o agregado tinha $D_{\text{máx}}=10\text{mm}$. Os sensores são inseridos em orifícios previamente feitos na cofragem, sendo que a face de contacto com o betão é oleada para evitar a aderência aquele material.

8. Impulso na cofragem devido à expansão do betão provocada pelo calor de hidratação

Vitek et al. [22] relatam um caso de betonagem de pilares em BAC com 5,1m de altura, 0,5 m de espessura e 3 m de largura (Fig.6), numa obra de construção de uma linha de um metropolitano, no Verão de 2005. O impulso na cofragem foi registado com recurso a sensores de 15mm, desde o início da betonagem e apresenta-se na Fig.7.



Figura 6. Betonagem de pilares durante a obra de construção da linha do metropolitano de Letnany -República Checa [22]

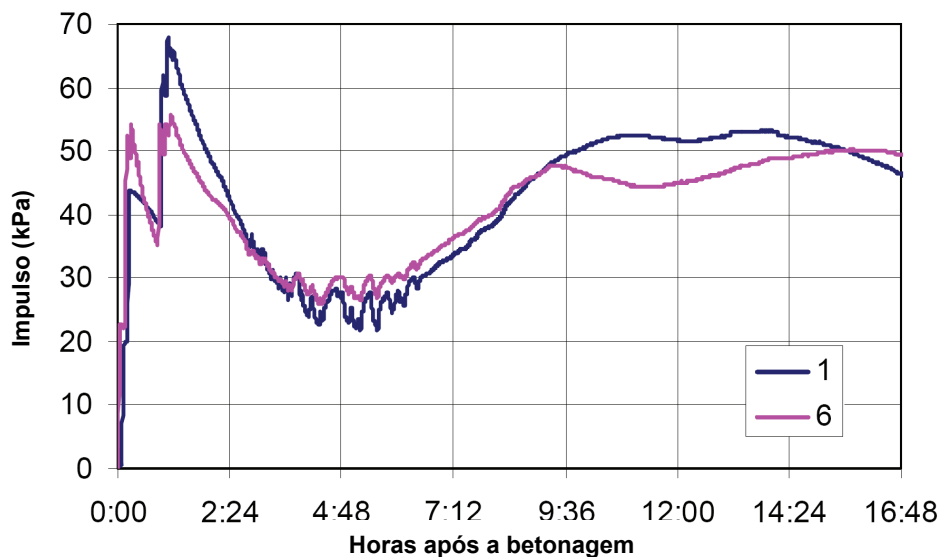


Figura 5. Registos do impulso após o início da betonagem [22]

O impulso na cofragem cresce rapidamente, sendo perceptível uma ligeira quebra devido a uma paragem do fornecimento do BAC. Após o reinício do fornecimento, o impulso cresce novamente até atingir o seu valor máximo, ao fim de aproximadamente 1 hora. A partir desse momento o impulso decresce rapidamente até atingir o valor mínimo por volta das 5 horas, do início dos registos. A partir desse período o impulso volta a crescer novamente devido à expansão do BAC, provocada pelo calor de hidratação. O máximo deste impulso ocorre por volta das 12 horas. Segundo os mesmos autores, para determinadas situações de composição e temperatura, (que não explicitam), pode acontecer que o segundo pico do impulso associado à expansão do betão pode crescer até alcançar o valor do primeiro. A importância deste caso prático e do fenómeno nele relatado, prende-se com o facto da maioria da bibliografia consultada relativa a impulsos de BAC's sobre cofragem e citada ao longo do presente artigo, ser omissa neste aspecto particular.

7. Conclusões

Embora as recomendações técnicas existentes aconselhem a que o dimensionamento das cofragens de peças verticais para BAC's, seja feito para a situação mais desfavorável do valor do impulso hidrostático, a observação de várias obras e os resultados obtidos em vários trabalhos de investigação, não confirmam, que essa situação seja a regra geral de comportamento destes materiais. São vários os factores que contribuem para um menor impulso relativo provocado pelos BAC's, dos quais se podem destacar, uma maior quantidade de agregados grossos, menor quantidade de cimento e de aditivos, menor consistência, a utilização de betonagem pelo topo da cofragem, uma maior densidade de armaduras do elemento a betonar e também a utilização de cofragens de madeira seca.

8. Referências

- [1] BARROS, J.A.O. [et al.] - Possibilidades e desafios do betão auto-compactável reforçado com fibras – do laboratório à aplicação real. Conferência "Inovação em betões : nova normalização e produção de betões especiais", ISBN 978-972-99179-2-9, 2006, Guimarães, Universidade do Minho, p. 49-68.

- [2] ACI COMMITTEE 347R-03 - Guide to formwork for concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2004, 32p.
- [3] LEEMANN, A.; HOFFMANN, C. - Pressure of self compacting concrete on the formwork. Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, 2003, pp.288-295, Reykjavik, Iceland
- [4] BILLBERG, P. - Form pressure generated by self-compacting concrete. Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, 2003, pp.271-280, Reykjavik, Iceland.
- [5] BANDEIRA, F. - Cofragens. Cálculo dos impulsos do betão e dimensionamento. Instituto de investigação e desenvolvimento tecnológico em ciências da construção-ITeCons/Ordem dos Engenheiros. 2005.
- [6] ASSAD, J.; KHAYAT, K. - Effect of coarse aggregate characteristics on lateral pressure exerted by self-consolidating concrete. ACI Materials Journal Vol. 102, 2005, pp.145-153.
- [7] GARDNER, N. - Formwork pressures and cement replacement by fly ash. Concrete International, 1984, pp.50-55.
- [8] ASSAD, J.; KHAYAT, K. - Kinetics of formwork pressure drop of self-consolidating concrete containing various types and contents of binder. Cement and Concrete Research Vol. 35, 2005, pp.1522-1530.
- [9] ASSAD, J.; KHAYAT, K. - Effect of viscosity-enhancing admixtures on formwork pressure and thixotropy of self-consolidating concrete. ACI Materials Journal Vol. 103, 2006, pp.280-287.
- [10] JARNY, S. [et al.] - Rheological behaviour of cement pastes from MRI velocimetry. Cement and Concrete Research Vol. 35, 2005, pp.1873-1881.
- [11] TCHAMBA, J. [et al.] - Lateral stress exerted by fresh cement paste on formwork: Laboratory experiments. Cement and Concrete Research Vol. 38, 2008, pp.459-466.
- [12] BILLBERG, P. - Form pressure generated by self-compacting concrete-Influence of thixotropy and structural behaviour at rest concrete. Doctoral Thesis, 2006, Royal Institute of Technology, Sweden.
- [13] SCC:EPG - European guidelines for self compacting concrete: Specification production and use. 2005.
- [14] CCANZ - Self-compacting concrete. Information Bulletin 86. 2007, www.cca.org.nz/shop/downloads/IB86.pdf
- [15] BRAMESHUBER, W.; UEBACHS, S. - Investigations on the formwork pressure using self-compacting concrete. Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, 2003, pp.281-287, Reykjavik, Iceland
- [16] PERROT, A. [et al.] - SCC formwork pressure: Influence of steel rebars. Cement and Concrete Research Vol.39, 2009, pp. 524-528.
- [17] OVARLEZ, G.; ROUSSEL, N. - A physical model for the prediction of lateral stress exerted by self-compacting concrete on formwork. Materials and Structures Vol.39, 2006, pp.269-279.
- [18] ROUSSEL, N. - A thixotropy model for fresh fluid concretes: theory, validation and applications. Cement and Concrete Research Vol.36, 2005, pp.319-325.
- [19] ARSLAN, M. [et al.] - Effects of formwork surface materials on the concrete lateral pressure. Construction and Building Materials Vol. 19, 2005, pp.319-325.
- [20] DJELAL, C. [et al.] - Role of demoulding agents during self-compacting concrete casting in formwork. Materials and Structures Vol. 35, 2002, pp.470-476.
- [21] ASSAD, J.; KHAYAT, K. - Measurement systems for determining formwork pressure of highly-flowable concrete. Materials and Structures Vol. 41, pp.37-46.
- [22] VITEK, J. [et al.] - Self-Compacting concrete and pressures on the formwork. Centre for Integrated Design of Advanced Structures-CIDEAS, 2005.